

# La pierre naturelle de construction, étude des transferts de chaleur et d'humidité et analyse de cycle de vie

Tristan PESTRE<sup>1</sup>, Emmanuel ANTCZAK<sup>2</sup>, Franck BRACHELET<sup>2</sup>, Didier PALLIX<sup>1</sup>, Quentin LEBONNOIS<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction (CTMNC), 17 rue Letellier, 75015 Paris.

<sup>2</sup>Univ. Artois, IMT Nord Europe, Junia, Univ. Lille, ULR 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), F-62400 Béthune, France.

**RESUME.** L'urgence climatique nous pousse à revoir nos modèles sociétaux, notamment en matière de développement et de consommation. Dans le secteur de la construction, qui est l'un des plus impactant, une solution pour lutter contre le réchauffement global pourrait être de favoriser la mixité des matériaux naturels, bio-sourcés ou géo-sourcés produits localement afin de bâtir des habitats confortables, sains et durables. Cette étude est consacrée à deux représentants de la catégorie, que sont la pierre naturelle calcaire et la fibre de bois. Les résultats expérimentaux issus de mesures effectuées sur des échantillons de parois seront confrontés à ceux provenant de simulations numériques afin d'analyser les effets des transferts couplés de chaleur et d'humidité, ainsi que d'évaluer la pertinence des modèles pour ce type de matériaux. Une seconde partie présentera l'analyse environnementale de plusieurs maçonneries en pierres naturelles dans le but de déterminer les principaux flux contributeurs de l'impact.

**Mots-Clés :** Analyse de cycle de vie, Transferts couples de chaleur et d'humidité, Composants de bâtiments durables.

## I. INTRODUCTION

L'étude conjointe des transferts de chaleur et d'humidité revêt une importance capitale sur de nombreux aspects liés aux constructions et plus particulièrement aux bâtiments. En effet, non seulement la présence d'eau va modifier le comportement thermique des matériaux, ayant alors un impact direct sur les performances énergétiques et le confort des occupants ; mais elle peut également être à l'origine de pathologies entraînant des conséquences néfastes sur la durabilité des ouvrages et la santé humaine. Certains auteurs ont étudié les transferts hygrothermiques dans les roches (Vigroux et al., 2021), tandis que d'autres se sont intéressés aux modèles physico-mathématiques permettant de les simuler. Dans cet article, nous présenterons succinctement l'étude réalisée dans le cadre d'un travail de thèse, qui traite notamment des transferts hygrothermiques dans les pierres naturelles. L'objectif de la démarche est d'analyser le comportement de ces matériaux et de confronter les résultats numériques issus de simulations à des relevés expérimentaux faits sur des échantillons de parois en chambre bi-climatique. Pour

L'analyse numérique, nous nous baserons le logiciel COMSOL Multiphysics qui intègre les modèles de bilan énergétique et de masse de l'ISO EN 15026. La seconde partie de cette étude sera consacrée à l'analyse de cycle de vie d'un panel de huit maçonneries en pierres naturelles calcaires. En effet, la nouvelle réglementation environnementale (RE2020) contraint les maîtres d'ouvrages à fournir les résultats de l'ACV de leur bâtiment pour obtenir le permis de construire. Les résultats présentés permettront d'alimenter une réflexion sur les pistes d'améliorations du bilan environnemental des produits en pierres naturelles.

## II. METHODOLOGIE

L'expérience en chambre bi-climatique a été menée à l'aide de deux caissons isolés thermiquement et étanches, instrumentés avec des capteurs de température et d'humidité (type HMP 60 de VAISALA), dont l'un contenait une résistance chauffante et l'autre l'évaporateur d'une machine frigorifique. La variation d'humidité est provoquée par l'utilisation alternée de solutions aqueuses à base de nitrate de potassium ( $\text{KNO}_3$  : 94%HR), et de dessiccants au chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$  : 0%HR). À l'interface entre les deux caissons, un bloc d'isolant en polyuréthane découpé en son centre permet d'accueillir un échantillon de paroi instrumenté à l'aide de capteurs de températures (thermocouples type T) et de capteurs d'humidité relative (type HIH-4000-003 d'Honeywell). Des fluxmètres thermiques sont encollés sur les deux faces externes de la paroi à tester (Captec). Le cas présenté concerne une pierre de Tuffeau (Brézé 49260) de 4 cm d'épaisseur, sur laquelle est apposée une laine de bois de 2 cm d'épaisseur. À l'interface, les capteurs sont fixés dans une fine rainure. Selon les sollicitations thermo-hydriques, ce cas peut être assimilé à une solution d'isolation thermique par l'intérieur ou bien par l'extérieur.

La modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité a été réalisée à l'aide du logiciel COMSOL® Multiphysics en raison de sa large diffusion dans les domaines de l'ingénierie et de sa grande polyvalence. Cependant, peu de données sur les propriétés des matériaux sont directement intégrées au logiciel, contrairement à d'autres plus spécialisés exploitent des bases de données plus conséquentes, comme WUFI®. Il faut alors, soit les déterminer spécifiquement, ce que nous avons fait pour les pierres (Pestre et al., 2022), ou les extraire de la bibliographie. Pour la laine de bois, nous nous sommes ainsi basés sur les travaux de M. ASLI (Asli, 2021). Les deux modules du logiciel utilisés sont « transferts de chaleur en milieux poreux » et « transport d'espèces diluées en milieux poreux », ainsi que le couplage par un nœud multiphysique. Par conséquent, le stockage de chaleur et d'humidité, l'effet de la chaleur latente, le transport d'eau, ainsi que la dépendance à la température et à l'humidité des propriétés sont considérés.

L'analyse de cycle de vie a été réalisée après collecte des flux (matières, énergies, distances, déchets) de huit exploitations d'extraction et de transformation de pierres naturelles. Ces données d'inventaires ont été converties pour être rapportées à une unité fonctionnelle : « assurer la fonction d'un mètre carré de mur en pierre massive d'épaisseur comprise entre 20 et 32 cm, pour une durée de vie de référence de 100 ans ». La méthodologie utilisée correspond à celle des normes NF EN 15804+A1 et NF EN 15804/CN, référentes pour la déclaration environnementale des produits de construction. Le logiciel SimaPro version 9 et la base de données Ecoinvent 3.7

ont été utilisés pour la modélisation et l'évaluation de l'impact sur le cycle de vie (EICV). Les méthodes d'allocation des impacts utilisées sont celles des normes précitées.

#### IV. RESULTATS ET DISCUSSION

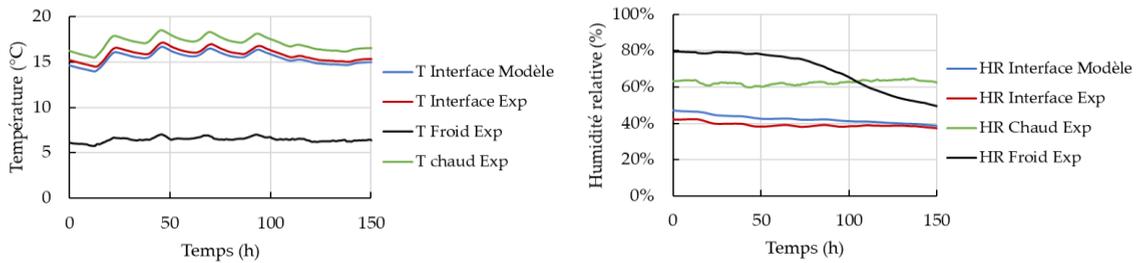


FIGURE 1. Pierre de Tuffeau avec laine de bois du côté froid, type ITE (Modèle et Expérience).

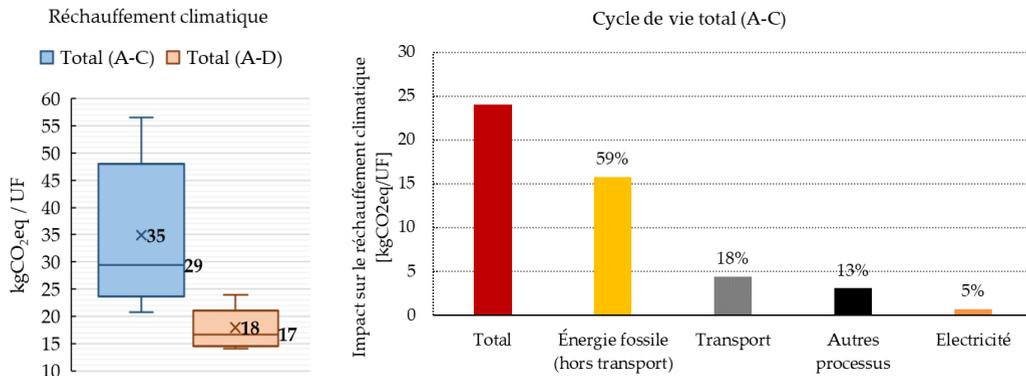


FIGURE 2. À gauche : ACV des 8 maçonneries ; à droite : principaux flux contributeurs (ex. : Tuffeau)

La confrontation des résultats expérimentaux et numériques sur les transferts de chaleur et d'humidité permet d'apprécier la pertinence du modèle et la qualité des données d'entrée. Une première configuration type « isolation thermique par l'intérieur » nous a permis de constater que la température entre la pierre et l'isolant est proche de la température du côté froid. Ce phénomène peut être à l'origine de pathologies pour la pierre qui sera davantage exposée aux risques inhérents aux cycles de gel-dégel. De plus, la faible température en ce point peut être à l'origine de condensation et donc de dégradation des performances énergétiques et de la durabilité de la paroi. Dans la figure 1, représentant « l'isolation thermique par l'extérieur », la température entre l'isolant et la pierre est assez élevée, plus proche de celle du côté chaud. Bien que l'humidité relative soit globalement élevée du côté froid comme du côté chaud, on remarque qu'elle reste moyenne entre l'isolant et la pierre. En considérant l'humidité spécifique à l'interface, on observe qu'elle est assez proche de celle du côté froid. En effet, la perméabilité à la vapeur d'eau de la laine de bois est supérieure à celle de la pierre. La température compense ce phénomène et avec ces matériaux, ce système d'isolation semble toutefois moins propice aux risques de condensation.

Les résultats des analyses environnementales présentées dans la partie gauche de la figure 2 nous montrent qu'une différence significative existe selon les étapes considérées dans le cycle de vie. L'inclusion des bénéfices et des charges au-delà du système, c'est-à-dire, le potentiel de recyclage, de réutilisation ou de réemploi des produits en pierre naturelle (A-D), permet de réduire l'impact, contrairement au cycle s'arrêtant à l'élimination des déchets (A-C). Il est à noter que les valeurs obtenues ne sont pas nécessairement représentatives de l'ensemble des exploitations de pierres calcaires françaises. Sur la partie droite de la figure 2, nous remarquons que le principal flux contributeur de l'impact est la combustion de combustibles fossiles hors transport. Cette consommation d'énergie serait partiellement liée à la dureté et à la résistance à l'abrasion de la pierre, mais aussi au rendement de l'exploitation. Pour minimiser ce flux, il faudrait donc augmenter le rendement, et recourir à des énergies moins carbonées. Avec le mix énergétique français pour la production d'électricité, nous remarquons que sa contribution est quasi négligeable. Un autre paramètre influent constaté serait l'épaisseur des produits. En effet, elle conditionne notamment le nombre de découpes nécessaires pour transformer le bloc brut en produit fini. S'agissant du fret, la masse transportée et la distance sont les deux facteurs prépondérants de l'impact. L'acheminement d'un produit fabriqué à 200 km est environ 10 fois moins impactant sur le réchauffement climatique que de le déplacer sur une distance de 2 000 km. Ceci est un bénéfice supplémentaire à la consommation de produits naturels locaux.

## V. CONCLUSION

La pierre naturelle est un matériau de construction ayant démontré sa durabilité et ses possibilités architecturales. L'exploitation de cette ressource disponible pour un usage local, dans le respect des règles de protection de l'environnement, permet de proposer des produits de construction à faibles impacts environnementaux. Leur utilisation peut contribuer à atteindre les différents objectifs et engagements en faveur du climat, tel que la stratégie nationale bas carbone ou la réglementation environnementale des bâtiments (RE2020). L'étude des transferts couplés de chaleur et d'humidité revêt une importance majeure pour éviter certaines pathologies du bâti, les problèmes de santé et la dégradation des performances énergétiques. Avec ces quelques exemples, nous avons montré que les modèles existants permettent de simuler efficacement les transferts couplés, dès lors que les données d'entrée que sont les propriétés des matériaux, sont adaptées aux produits. Toutes les solutions constructives disposent d'avantages dont il faut savoir tirer profit. Pour cela, il est nécessaire d'adapter la conception des projets aux sollicitations, en utilisant pertinemment des outils de conception et des données fiables sur les matériaux.

## VI. REFERENCES

- Asli, M., Sassine, E., Brachelet, F., Antczak, E., Hygrothermal behavior of wood fiber insulation, numerical and experimental approach. *Heat Mass Transfer* 57, 1069–1085 (2021). <https://doi.org/10.1007>
- Pestre, T., Antczak, E., Brachelet, F., Pallix, D., 2022. Multiphysical Characteristics of Limestones for Energy-Efficient and Sustainable Buildings Components. *J. Mater. Civ. Eng.* 34, 04022024. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004158](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004158)
- Vigroux, M., Eslami, J., Beaucour, A.-L., Bourgès, A., Noumowé, A., 2021. High temperature behaviour of various natural building stones. *Construction and Building Materials* 272, 121629. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121629>